第 37 卷第 12 期
2017 年 6 月

生 态 学 报
ACTA ECOLOGICA SINICA

Vol.37,No.12
Jun.,2017

DOI:10.5846/stxb201702270318
张志明,徐倩,王彬,孙虎,耿宇鹏,田冀.无人机遥感技术在景观生态学中的应用.生态学报,2017,37(12):4029-4036.
Zhang Z M,Xu Q, Wang B, Sun H, Geng Y P, Tian J.Applications of unmanned aerial vehicles remote sensing technology in landscape ecology.Acta Ecologica Sinica,2017,37(12):4029-4036.

无人机遥感技术在景观生态学中的应用

张志明,徐 倩,王 彬,孙 虎,耿宇鹏*,田 冀
云南大学生态学与环境学院,生态学与地植物学研究所, 昆明 650091

摘要:野外数据的获取是生态学研究的挑战之一,而通过遥感技术能够实现对地球表面的多面立体观测,获取丰富多样的空间信息数据,开展从微观到宏观不同尺度上的景观单元(包括物种、种群、群落、生态系统等)的空间关系研究。传统卫星遥感影像受空间和时间分辨率的限制,难以满足局域尺度或者时间序列上的景观空间生态学研究需求。无人机遥感技术为生态学研究的野外数据获取提供了一种新方法,以其灵活、高效、简便等特点弥补了传统卫星遥感的空间分辨率低、重访周期长、云雾影响等方面的不足,在景观空间生态学研究中受到越来越多的关注。简要介绍无人机类型及其搭载常见的传感器类型,分别从不同尺度的景观单元,即物种、种群、群落以及生态系统水平上探讨其应用进展,并指出当前无人机技术在景观生态学研究中存在的挑战与困难,同时展望了未来可能的研究热点,以期对今后无人机遥感技术在景观生态学领域的应用研究有所启发。
关键词:无人机;遥感;生态调查;生物多样性监测;景观空间生态学

Applications of unmanned aerial vehicles remote sensing technology in landscape ecology

ZHANG Zhiming,XU Qian, WANG Bin, SUN Hu, GENG Yupeng*, TIAN Ji
Institute of Ecology and Geobotany, School of Ecology and Environmental Science, Yunnan University, Kunming 650091, *China*

Abstract: Acquiring accurate, spatially explicit data is crucial for ecologists, particularly for long-term landscape and spatial ecological research. Remote sensing techniques have been widely used for collecting data on spatial and temporal ecological phenomena over the last decades. However, owing to the limitations of spatial and temporal resolution of satellite image data, they are sometimes hard to incorporate into regional or local temporal ecological studies. Unmanned aerial vehicles (UAV) remote sensing technology provides a new method for ecological field data acquisition. With its flexibility, efficiency, and convenience, UAV remote sensing technology overcomes the limitations of traditional satellite-based remote sensing in terms of resolution, revisit period, and cloud cover, which has been increasingly focused in studies on landscape ecology. The present study introduced UAV classification and sensor types, in addition to its applications in species, population, community, and ecosystem research. In addition, it pointed out the challenges involved in these applications. We look forward to the promising research area of UAV-based landscape ecology.

Key Words: UAV; remote Sensing; ecology survey; biodiversity monitoring; Landscape and Spatial Ecology

野外数据的获取是生态学研究的挑战之一,而通过遥感技术能够实现对地球表面的多面立体观测,获取丰富多样的空间信息数据,进而从不同的时空尺度上开展生态学的相关研究,并取得了许多重要研究成

基金项目:国家重点研发计划(2016YFC1201100);国家自然科学基金项目(41361046)
收稿日期:2017-02-27; **修订日期**:2017-05-07
*通讯作者 Corresponding author.E-mail: ypgeng@ynu.edu.cn,

果[1-5]。景观生态学主要研究从微观到宏观不同尺度上具有异质性的空间单元的类型组成、空间格局及其与生态学过程的关系[6-8],即从微观到宏观不同尺度上的景观单元(包括物种、种群、群落、生态系统等)的空间关系研究都是属于景观生态学的研究范畴[7]。近 30 年来,遥感和地理信息系统技术对推动景观生态的迅速发展起着举足轻重的作用,卫星遥感是景观和空间生态学研究的重要数据源,景观生态学家利用这些数据结合遥感和 GIS 空间分析方法开展了景观格局、变化过程、景观和生态服务和功能评估等研究[4-5]。有研究表明 2004—2008 年间,Landscape Ecology 上 36%的论文都与遥感有关[5]。

然而,早期的卫星遥感影像受分辨率和重访周期的限制(例如,MODIS 数据空间分辨率 1000m;Landsat 数据空间分辨 30m,访问周期 18d),难以满足局域尺度或者时间序列上生态学研究的更高需求[9-10]。近年来,一些大型商业公司开发了新的卫星传感器,能够获取 10m 以内高分辨率遥感影像数据(例如,IKONOS、Quickbird、WorldView 等数据),但这些数据无法避开云雾干扰,且获取成本高,尤其在多云的山地区域,这些数据也难以满足个体、种群、群落乃至生态系统层次上生态过程研究需求[4-5,11]。

随着无人机技术的飞速发展,催生了无人机低空摄影测量和遥感(Photogrammetry and Remote Sensing,PaRS)技术,该技术具有拍摄影像分辨率高、重叠率大、姿态角大、相幅小、数量多等特点,因此无论是在商业还是科学应用等方面都有着巨大的发展潜力[12-13]。自 2000 年以后,随着该技术的迅速发展,一些小型轻便的无人机被广泛应用,这些小型化的无人机具有起降灵活、搭载不同类型的传感器的种类可获得对应的高分辨率地面信息,使用成本低、受气候影响小等优点,日渐成为人们关注的热点[12,14-15]。

近 10 年来是无人机航空摄影测量和遥感技术高速发展时期,2004 年的伊斯坦布尔国际摄影测量遥感大会上仅 3 篇有关无人机航测遥感应用的文章;而于 2008 年北京国际摄影测量遥感大会上有 21 篇有关无人机航测及遥感制图的文章,并且有 3 个分会场是关于无人机相关应用的报告;2012 年墨尔本国际摄影测量遥感大会上,有关无人机航测遥感应用的文章有 50 多篇,并且 9 个分会场有相关报告[12]。当前无人机航空摄影和遥感技术被广泛的应用于森林和湿地生态系统调查及监测[16-19];自然和文化遗产调查和监测[20];城市植被制图[21];考古[22];地震和泥石流地质灾害调查和评估[23-24]等。

前人针对无人机近地面航空遥感技术的有关应用进行了不同的综述,如无人机系统分类[25-26];无人机系统在测绘遥感方面的综述[12];无人机系统在农业上的应用[27-28];无人机遥感用于不同类型的植被调查和生物多样性监测研究[29-30]等。总体而言,这些综述主要关注无人机遥感技术在地表类型的识别、提取和监测方面的应用以及具体介绍无人机平台系统的类型和发展等。由于无人机能搭载不同类型的传感器的种类可获得非常高分辨率地面信息,使其最可能让传统卫星遥感技术走出无法提供大尺度高精度数据的局限[30]。因此无人机航空摄影测量和遥感技术也日益受到生态学家的关注,尤其是宏观和空间生态学家的关注[31]。本文主要针对无人机在生态学尤其是空间和景观生态学上的应用和发展。

1 无人机及传感器类型

当前市场上的无人机种类繁多,不同的机型主要根据其大小和飞行动力来进行区分。现有的无人机分类方式繁多且没有统一标准,比如,根据机翼长度和载荷重量可分为大型、中型、小型和微型无人机;根据动力系统可分为无动力型和动力型;根据飞行原理及结构可分为固定翼、旋翼和扑翼无人机[31]。目前小型和微型无人机在生态学研究中最受关注,最为常用的是旋翼无人机,其最突出的特点是能够实现目标悬停,它更适用于获取空间信息的垂直切面数据[32]。其次是固定翼无人机,固定翼的无人机飞行范围一般在几千米以内,比旋翼无人机的飞行速度稍快,通常也比旋翼无人机飞行时间长[32]。将固定翼无人机与 GPS 技术充分结合,能够获取相对大面积范围内的航片,适用于较大范围的植被和生态系统数据获取和监测。但是该类型无人机成本较高,相对于旋翼无人机,其稳定性稍差些,并且不能悬停,不利于定点目标的监测。

此外,无人机是一个新的平台,可以搭载不同类型的摄像仪和传感器,如普通数码相机(可见光)、激光雷达扫描仪、多光谱影像仪、高光谱影像仪、热成像仪等[12,29]。生态学家可以根据其研究需求选择不同的传感

器来获取数据(表 1)。

表 1　几种常见传感器数据产品及生态学应用

Table 1　Products of common sensors and their ecological applications

传感器类型 Types of sensors	产出数据 Products	生态应用 Ecological applications
可见光数码相机 RGB digital cameras	正射影像、数字表面模型	物种识别[19,33-34]、地形信息[35]、树高估测[36]、生物多样性研究[37]、生态系统管理[38]
多光谱传感器 Multi-spectral sensors	多波段光谱信息	植物入侵[39]、植被生物量[40]、病虫害[41]
高光谱传感器 Hyperspectral sensors	全波段光谱信息	植物氮含量[42]、叶片性状指数[43]、植物物候期[44]、生物量[45]、病虫害[46]
热红外相机 Thermal imaging sensors	温度图谱	叶温[47]、森林火灾监测[48]、热排放监测[49-50]
激光雷达 LiDAR	点云、数字表面模型、数字地面模型	林木提取[51]、生物量估测[52]、林冠研究[53]、群落结构[54]

2　不同层次的景观生态学应用研究

尽管已经有不少学者将无人机近地面遥感技术应用于生态学相关研究,但是该技术在生态学中的应用仍然是起步阶段[55]。如上所述,从微观到宏观不同尺度上的景观单元(包括物种、种群、群落、生态系统等)的空间关系研究都是属于景观生态学的研究范畴[7]。本文将从物种、种群、群落,及生态系统层次介绍无人机在空间景观生态学领域的应用,以期对该技术今后在生态学领域的应用有所启发。

2.1　物种及种群层次景观空间生态研究

由于受空间分辨率的制约,传统的卫星遥感数据难以开展物种和种群调查监测研究[4,56]。而通过无人机技术获取的数据分辨率较高,能对满足针对单个或几个物种的识别及其空间分布格局研究。Zweig 等[19]利用无人机技术对湿地植物进行研究,其搭载单反数码相机获取研究区的正射影像,然后进行物种识别及植被分类,成功识别出了湿地生境内的几种草本植物,并得到了研究区内的高精度的植被类型图。Flynn 等[44]对美国蒙塔纳州西部的 Clark Fork 河中一种绿藻(*Cladophora glomerata*)进行动态监测,结果显示,这种藻类的每公里河道内的盖度变化在 5%—50%之间,变化动态表现为春季涨水后逐渐增加,在盛夏时达到峰值,入秋后逐渐减小。周在明等[39]利用无人机获取的可见光和多光谱影像,对入侵植物互花米草(*Spartina anglica Hubb*)进行监测,基于 NDVI 指数得到互花米草的植被覆盖度。利用无人机数据还可进行植物种群分布研究,其制图分类精度可高达 96%[19,33,57]。但是无人机高分辨率的航片数据可以实现植物物种识别,但生境复杂或植株较小、种间相似度高时可能会影响其识别精度[33]。

也有学者将无人机应用于野生动物的识别,及其种群空间分布区预测研究,并展示了无人机在野生动物识别、管理以及保护规划制定等方面的应用潜力[58-60]。如 Sarda-Palomera 等[61]探究了如何利用小型无人机对黑头鸥种群进行动态监测,表明无人机可以获取一些人为难以到达区域的数据,同时又能保证监测对其栖息地的干扰减小。有学者研发了一种用无人机进行海洋哺乳动物种群的调查方法,该研究利用搭载单反数码相机的无人机获取了 6243 张照片,以儒艮(*Dugong dugon*)种群数量调查为例,共有识别出 627 只儒艮,此外还包括了一些鲸鱼、海豚等动物,结果表明把无人机作为海洋哺乳动物种群调查的工具有巨大的应用前景[62]。

此外,利用无人机搭载不同的传感器可以开展植物物种生理、病虫害的空间格局和过程研究。Zarco-Tejada 等[63]的研究利用无人机搭载热成像相机和高光谱相机对柑橘果园监测,获取了树冠温度、叶片的光学指标及叶绿素荧光指数,并与地面测得的叶片气孔导度、水势数据做相关分析,叶片温度可以判定植物受到的水分胁迫强弱,这些生理特征反映在无人机获取的空间温度图谱上,从而分析其空间格局。胡根生等[41]利用

无人机获取的可见光和近红外图像,采用加权支持向量数据描述多分类算法,实现了对病虫害松树的识别,并进行病虫害松树的空间分布格局特征,相比传统的人工调查或航空卫星影像识具有成本低可操作性强的优点。

无人机通过搭载不同传感器可以获取相应植物物种的生理数据,从而可以进行植物生理生态的空间化研究,而如何基于此进一步开展诸如植物水分运输、光合作用等生态过程空间层面上的研究还有待探索。

2.2 植物群落层次景观空间生态学研究

Salami 等[29]综述了无人机技术在植被遥感领域的应用和发展前景,指出由于无人机航空摄影遥感的低成本,尤其是搭载常规数码相机的无人机平台能够获得高时间和高空间分辨率的影像,是对传统卫星遥感的一个非常好的补充。

目前无人机在植被群落研究中的应用主要有以下几个方面:(1)植物群落分类与制图,如 Mora 等[64]运用无人机获取的可见光波段影像与有人驾驶飞机获取的航片(包括可见光波段和近红外波段)做融合处理,对位于 Adventdalen 的河流冲击扇区域进行植被制图,结果表明,在物种水平上无法将禾本科、柳属以及某些苔藓植物区分开,但可以很好的将植被与其他土地覆盖类分开;(2)植物群落生物多样性测定和监测,如 Getzin 等[37]基于无人机获取的高分辨影像提取森林(温带)林窗,以林窗特征来反映森林群落的生物多样性,通过计算景观斑块(林窗)指数,结合实际植物样方数据、土壤数据做线性相关分析,结果显示该方法可以有效估测温带森林的生物多样性。Zhang 等[65]在鼎湖山设置 20 公顷的大样地,利用搭载数码微单的无人机对其进行植被动态监测,获得其数字表面模型(Digital Surface Model, DSM),结合数字高层模型(Digital Elevation, Model, DEM)计算出森林冠层高度,并结合实际植物样方数据、地形气象数据等,计算生物多样性指数,然后进行数据的统计及相关性分析,探讨了利用无人机对森林群落进行长期监测的实用性与可行性;(3)植物群落生物量估测,何游云[50]利用无人机获取的遥感影像进行单木林冠提取,再根据实测数据建立单木预测模型,然后根据样地调查数据拟合研究区主要树种的相关模型,估测了研究区内不同树种的地上生物量;(4)森林群落结构分析,Wallace 等[53]利用搭载激光雷达的无人机获取了研究区的 3D 点云数据,对点云数据进行处理,得到了研究区内树木位置、树冠、冠层性状等信息。Trichon[66]利用无人机航拍影像进行热带雨林林冠拓扑结构和林冠树种识别。

2.3 生态系统层次景观空间生态学研究

通过无人机可以收集气温、湿度等气象数据,同时结合数字正射影像(Digital Orthophoto Map, DOM)、数字表面模型和数字高层模型等数据,有助于生态系统的监测和管理,同时还可进行生态评价、生态过程(如生态系统演替)等相关研究。梁婷等[38]通过无人机获取数据提取正射影像、水质参数、水体理化指标和土地利用类型等信息,与研究区河流的底栖动物完整性指数结合分析,对辽河保护区干流上游河流生态系统健康进行了评价。Homainejad 和 Rizos[48]对比分析了几种不同类型的无人机对不同规模的森林火灾进行监测,探讨出更好地将无人机技术与森林生态系统火灾的监测预警结合起来的方法。此外,Nishar 等[67]尝试利用无人机获取的可见光信息和热红外信息对环境表温度进行监测,这为利用无人机进行生态监测提供了基础。

总体而言,目前利用无人机平台开展空间景观生态学的研究多为物种、种群和群落层次,相对于卫星遥感而言,无人机航空摄影能获得更高时空分辨率的数据,因此能开展更加精细的物种和群落层次的研究。只有探索更好的运用无人机进行物种、种群、群落水平研究的方法,才能顺利开展运用无人机进行生态系统与生态过程相关研究。由于受当前小型无人机的飞行时间限制,当前研究的空间尺度相对较小,所以针对生态系统和景观层次的研究相对较少,但这也必然是将来无人机应用发展的一个重要趋势之一[31].

3 展望

随着系统集成技术的发展,无人机搭载的传感器将更加多样,这将为生态学研究中的空间信息获取带来更多可能性。Anderson 和 Gaston[31]指出无人机技术将会对空间生态学带来革命性的发展。

首先,由于无人机的灵活性,且可以搭载多样的传感器,因此可以获得类型多样,高时间、高空间、高光谱分辨率的低空航拍遥感数据,尤其是大量的航空正射影像、雷达影像、高光谱影像数据等等(表 1)。然而这些无人机航拍影像,具有数据量大,重叠度高、方向变异大,以及受地形和无人机飞行角度和姿态等影响造成航拍影像通常变形大,因此对数据处理和解译带来很大的挑战[27,68]。但是这也势必会推动无人机遥感数据处理、解译和分析等方法的迅速发展[68]。例如,景观指数法是进行景观格局和过程分析的最常用方法,然而基于 2D 的卫星遥感影像数据发展起来的 2D 景观指数存在诸多限制,尤其是忽略了地物景观(如植物群落、城市建筑等等)的垂直 3D 结构[69-70]。当前,UAV 搭载雷达(Lidar)传感器能获得植物群落和建筑物等的 3D 结构,这为我们发展真正的 3D 景观指数,进行景观单元的 3D 结构分析带来可能。

其次,传统植物生理生态学和功能生态学主要依赖于野外采样获取植物群落中植物样品的生理特征(如水分含量、叶绿素、胡萝卜素等),光合作用能力,以及植物叶片功能性状特征等。因此传统野外采样很难获得植物群落生理及其叶片等功能性状的空间格局特征。当前,由于无人机可以搭载高级高光谱传感器,可以获取森林生态系统林冠植物物种的功能性状特征,包括其物理和生理的功能性状,从而可以进行森林生态系统生理特征及功能性状空间制图,进而促进空间功能生态学发展[71-72]。这将有助于将来更准确的进行生物多样性评估、森林结构分析、林木蓄积量估测,以及生物量估测等等,进而促进生态系统、景观服务的评估以及生物多样性保护研究发展[73-74]。

此外,格局与生态过程分析长期以来是景观生态学的核心研究内容之一[74-76]。由于受传统卫星遥感数据空间分辨率的影响,传统"斑块—廊道—基质"景观格局研究范式的景观生态学研究主要关注干扰以及破碎化过程等[77],通常忽略了不同景观单元或斑块内部和斑块之间的生态过程。无人机搭载不同的传感器能获取物种、种群和群落等层次上的高时空分辨率的影像数据,从而为我们从空间上开展物种迁移、种群竞争、群落演替,乃至生态系统的物质循环等生态过程与格局的关系研究提供可能。同时无人机影像能提取景观单元和植物群落的 3D 结构,从而为我们提取小尺度上的生态交错带和行道树、篱笆、田埂等小景观单元,并为分析其景观格局和过程提供可能。

再次,近年来由于城镇化的迅速发展,形成一种独特的高异质性的城市景观,而这一独特的景观在继续不断发展扩大。景观生态学家们将景观生态学的理论与方法应用于城镇化研究中,并发展形成了"城市景观生态学(Urban Landscape Ecology)"[76]这一新兴学科。无人机遥感技术可以广泛的应用于城市的景观单元提取、城市热岛效应监测、城市小气候测定以及城市格局变化和城市生态环境效应等研究中。

最后,尺度和尺度转换是生态学和地理学的研究核心问题之一[75-76]。多年来,许多生态学和地理学工作者针对景观格局分析和尺度转换中的难点开展了大量工作,试图提出可以进行尺度转换的科学方法[78-81]。然而由于尺度效应的复杂性和尺度转换过程的不确定性,目前这项研究仍然缺乏突破性进展。由于无人机低空遥感的近地面性和灵活性,一方面能获得非常高的空间分辨率遥感影像,另一方面也可以获得高时间分辨率的遥感数据,这为空间格局尺度和过程尺度转换方法发展带来契机[31,82]。

总体而言,技术的革新能促进学科的发展,无人机技术的发展将为生态学研究的带来新的机遇与挑战。利用无人机遥感技术可以进行重复采样,定制影像数据,追踪监测,只有充分利用技术的进步,我们才不会错过自然生态中的关键事件。

参考文献(References):

[1] Kerr J T, Ostrovsky M. From space to species: ecological applications for remote sensing. Trends in Ecology & Evolution, 2003, 18(6): 299-305.

[2] Running S W, Nemani R R, Heinsch F A, Zhao M S, Reeves M, Hashimoto. A continuous satellite-derived measure of global terrestrial primary production. BioScience, 2004, 54(6): 547-560.

[3] Vierling K T, Vierling L A, Gould W A, Martinuzzu S, Clawges R M. Lidar: shedding new light on habitat characterization and modeling. Frontiers in Ecology and the Environment, 2008, 6(2): 90-98.

[4] Aplin P. Remote sensing: ecology. Progress in Physical Geography, 2005, 29(1): 104-113.

[5] Newton A C, Hill R A, Echeverria C, Golicher D, Benayas J M R, Cayuela L, Hinsley S A. Remote sensing and the future of landscape ecology. Progress in Physical Geography, 2009, 33(4): 528-546.
[6] Forman R T T, Godron M. Landscape Ecology. New York, USA: John Wiley and Sons, 1986.
[7] 邬建国. 景观生态学——概念与理论. 生态学杂志, 2000, 19(1): 42-52.
[8] 傅伯杰, 陈利顶, 马克明, 王仰麟. 景观生态学原理及应用(第二版). 北京: 科学出版社, 2011.
[9] 张秋菊, 傅伯杰, 陈利顶. 关于景观格局演变研究的几个问题. 地理科学, 2003, 23(3): 264-270.
[10] Wulder M A, Hall R J, Coops N C,Fraklin S E. High spatial resolution remotely sensed data for ecosystem characterization. BioScience, 2004, 54(6): 511-521.
[11] Loarie S R, Joppa L N, Pimm S L. Satellites miss environmental priorities. Trends in Ecology & Evolution, 2007, 22(12): 630-632.
[12] Colomina I, Molina P. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: a review. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2014, 92: 79-97.
[13] Ambrosia V G, Wegener S, Zajkowski T, Sullivan D V, Buechel S, Enomoto F, Lobitz B, Johan S, Brass J, Hinkley. The Ikhana unmanned airborne system (UAS) western states fire imaging missions: from concept to reality (2006-2010). Geocarto International, 2011, 26(2): 85-101.
[14] 王峰, 吴云东. 无人机遥感平台技术研究与应用. 遥感信息, 2010, (2): 114-118.
[15] Marris E. Drones in science: fly, and bring me data. Nature, 2013, 498(7453): 156-158.
[16] Montaghi A, Corona P, Dalponte M, Gianelle D, Chirici G, Olsson H. Airborne laser scanning of forest resources: an overview of research in Italy as a commentary case study. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2013, 23: 288-300.
[17] Puliti S, Ørka H O, Gobakken T, Næsset E. Inventory of small forest areas using an unmanned aerial system. Remote Sensing, 2015, 7(8): 9632-9654.
[18] Chabot D, Bird D M. Small unmanned aircraft: precise and convenient new tools for surveying wetlands. Journal of Unmanned Vehicle Systems, 2013, 1(1): 15-24.
[19] Zweig C L, Burgess M A, Percival H F, Kitchens W M. Use of unmanned aircraft systems to delineate fine-scale wetland vegetation communities. Wetlands, 2015, 35(2): 303-309.
[20] Madden M, Jordan T, Cotten D, O'Hare N, Pasqua A, Bernardes S. The future of unmanned aerial systems (UAS) for monitoring natural and cultural resources. //Fritsch D, ed. Photogrammetric Week'15: Belin, Offenbach: Wichmann/VDE Verlag, 2015: 369-384.
[21] Feng Q L, Liu J T, Gong J H. UAV remote sensing for urban vegetation mapping using random forest and texture analysis. Remote Sensing, 2015, 7(1): 1074-1094.
[22] Agapiou A, Lysandrou V. Remote sensing archaeology: tracking and mapping evolution in European scientific literature from 1999 to 2015. Journal of Archaeological Science Reports, 2015, 4: 192-200.
[23] 李军, 李永树, 蔡国林. 利用无人机影像制作地震灾区三维景观图. 测绘工程, 2012, 21(1): 50-53.
[24] Scaioni M, Longoni L, Melillo V, Papini M. Remote sensing for landslide investigations: an overview of recent achievements and perspectives. Remote Sensing, 2014, 6(10): 9600-9652.
[25] Watts A C, Ambrosia V G, Hinkley E A. Unmanned aircraft systems in remote sensing and scientific research: classification and considerations of use. Remote Sensing, 2012, 4(6): 1671-1692.
[26] 李德仁, 李明. 无人机遥感系统的研究进展与应用前景. 武汉大学学报: 信息科学版, 2014, 39(5): 505-513, 540-540.
[27] Zhang C H, Kovacs J M. The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: a review. Precision Agriculture, 2012, 13(6): 693-712.
[28] Zecha C W, Link J, Claupein W. Mobile sensor platforms: categorisation and research applications in precision farming. Journal of Sensors and Sensor Systems, 2013, 2(1): 51-72.
[29] Salami E, Barrado C, Pastor E. UAV flight experiments applied to the remote sensing of vegetated areas. Remote Sensing, 2014, 6(11): 11051-11081.
[30] 郭庆华, 吴芳芳, 胡天宇, 陈琳海, 刘瑾, 赵晓倩, 高上, 庞树鑫. 无人机在生物多样性遥感监测中的应用现状与展望. 生物多样性, 2016, 24(11): 1267-1278.
[31] Anderson K, Gaston K J. Lightweight unmanned aerial vehicles will revolutionize spatial ecology. Frontiers in Ecology and the Environment, 2013, 11(3): 138-146.
[32] Hardin P J, Jensen R. Small-scale unmanned aerial vehicles in environmental remote sensing: challenges and opportunities. Giscience & Remote Sensing, 2011, 48(1): 99-111.
[33] Ishihama F, Watabe Y, Oguma H. Validation of a high-resolution, remotely operated aerial remote-sensing system for the identification of herbaceous plant species. Applied Vegetation Science, 2012, 15(3): 383-389.

[34] 杨龙, 孙中宇, 唐光良, 林志文, 陈燕乔, 黎喻, 李勇. 基于微型无人机遥感的亚热带林冠物种识别. 热带地理, 2016, 36(5): 833-839.

[35] 王湘文, 于启升, 王雅鹏. 无人机低空摄影测量系统在大比例尺地形图中的应用. 地矿测绘, 2013, 29(1): 34-36.

[36] Zarco-Tejada P J, Diaz-Varela R, Angileri V, Loudjani P Tree height quantification using very high resolution imagery acquired from an unmanned aerial vehicle (UAV) and automatic 3D photo-reconstruction methods. European Journal of Agronomy, 2014, 55: 89-99.

[37] Getzin S, Wiegand K, Schöning I. Assessing biodiversity in forests using very high-resolution images and unmanned aerial vehicles. Methods in Ecology and Evolution, 2012, 3(2): 397-404.

[38] 梁婷, 朱京海, 徐光, 李润东, 可欣, 马云峰, 问鼎. 应用B-IBI 和 UAV 遥感技术评价辽河上游生态健康. 环境科学研究, 2014, 27(10): 1134-1142.

[39] 周在明, 杨燕明, 陈本清. 基于无人机遥感监测滩涂湿地入侵种互花米草植被覆盖度. 应用生态学报, 2016, 27(12): 3920-3926.

[40] 何游云. 无人机遥感估测林木地上生物量的研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2016.

[41] 胡根生, 张学敏, 梁栋, 黄林生. 基于加权支持向量数据描述的遥感图像病害松树识别. 农业机械学报, 2013, 44(5): 258-263, 287-287.

[42] 秦占飞, 常庆瑞, 谢宝妮, 申健. 基于无人机高光谱影像的引黄灌区水稻叶片全氮含量估测. 农业工程学报, 2016, 32(23): 77-85.

[43] 田明璐, 班松涛, 常庆瑞, 由明明, 罗丹, 王力, 王烁. 基于低空无人机成像光谱仪影像估算棉花叶面积指数. 农业工程学报, 2016, 32(21): 102-108.

[44] Flynn K Y, Chapra S C. Remote sensing of submerged aquatic vegetation in a shallow non-turbid river using an unmanned aerial vehicle. Remote Sensing, 2014, 6(12): 12815-12836.

[45] 刘焕军, 康苒, Ustin S, 张新乐, 付强, 盛磊, 孙天一. 基于时间序列高光谱遥感影像的田块尺度作物产量预测. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(8): 2585-2589.

[46] Näsi R, Honkavaara E, Lyytikäinen-Saarenmaa P, Blomqvist M, Litkey P, Hakala T, Viljanen N, Kantola T. Using UAV-based photogrammetry and hyperspectral imaging for mapping bark beetle damage at tree-level. Remote Sensing, 2015, 7(11): 15467-15493.

[47] Bellvert J, Zarco-Tejada P J, Girona J, Fereres E. Mapping crop water stress index in a 'Pinot-noir' vineyard: comparing ground measurements with thermal remote sensing imagery from an unmanned aerial vehicle. Precision Agriculture, 2014, 15(4): 361-376.

[48] Homainejad N, Rizos C. Application of multiple categories of unmanned aircraft systems (UAS) in different airspaces for bushfire monitoring and response. International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2015, XL-1(W4): 55-60.

[49] 洪运富, 杨海军, 李营, 蔡明珂, 朱海涛, 赵爽, 郭会敏. 水源地污染源无人机遥感监测. 中国环境监测, 2015, 31 (5): 163-166.

[50] 李京荣, 张峰, 杨海军, 洪运富, 李营, 朱海涛. 基于无人机的水源地污染源监测方法及系统: 中国, CN201510026397.6 [2015-05-27].

[51] Colgan M S, Baldeck C A, Feret J B, Asner G P. Mapping savanna tree species at ecosystem scales using support vector machine classification and BRDF correction on airborne hyperspectral and LiDAR data. Remote Sensing, 2012, 4(11): 3462-3480.

[52] Jaakkola A, Hyyppä J, Kukko A, Yu X W, Kaartinen H, Lehtomäki M, Lin Y. A low-cost multi-sensoral mobile mapping system and its feasibility for tree measurements. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2010, 65(6): 514-522.

[53] Wallace L, Lucieer A, Watson C, Turner D. Development of a UAV-LiDAR system with application to forest inventory. Remote Sensing, 2012, 4 (6): 1519-1543.

[54] Lin Y, Hyyppa J, Jaakkola A. Mini-UAV-borne LIDAR for fine-scale mapping. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2011, 8(3): 426-430.

[55] Ivosevic B, Han Y G, Cho Y, Kwon O. The use of conservation drones in ecology and wildlife research. Journal of Ecology and Environment, 2015, 38(1): 113-118.

[56] Turner W, Spector S, Gardiner N, Fladeland M, Sterling E, Steininger M. Remote sensing for biodiversity science and conservation. Trends in Ecology & Evolution, 2003, 18(6): 306-314.

[57] Kalacska M, Arroyo-Mora J P, de Gea J, Snirer E, Herzog C, Moor T R. Videographic analysis of *Eriophorum vaginatum* spatial coverage in an ombotrophic bog. Remote Sensing, 2013, 5(12): 6501-6512.

[58] Chretien L P, Théau J, Ménard P. Wildlife multispecies remote sensing using visible and thermal infrared imagery acquired from an unmanned aerial vehicle (UAV). International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2015, XL-1(W4): 241-248.

[59] Mulero-Pázmány M, Barasona J Á, Acevedo P, Vicente J, Negro J J. Unmanned aircraft systems complement biologging in spatial ecology studies. Ecology and Evolution, 2015, 5(21): 4808-4818.

[60] Christie K S, Gilbert S L, Brown C L, Hatfield M, Hanson L. Unmanned aircraft systems in wildlife research: current and future applications of a transformative technology. Frontiers in Ecology and the Environment, 2016, 14(5): 241-251.

[61] Sardà-Palomera F, Bota G, Viñolo C, Pallarés O, Sazatornil V, Brotons L, Gomáriz S, Sardà F. Fine-scale bird monitoring from light unmanned aircraft systems. IBIS, 2012, 154(1): 177-183.

[62] Hodgson A, Kelly N, Peel D. Unmanned aerial vehicles (UAVs) for surveying marine fauna: a dugong case study. PLoS One, 2013, 8

(11): e79556.

[63] Zarco-Tejada P J, González-Dugo V, Berni J A J. Fluorescence, temperature and narrow-band indices acquired from a UAV platform for water stress detection using a micro-hyperspectral imager and a thermal camera. Remote Sensing of Environment, 2012, 117: 322-337.

[64] Mora C, Vieira G, Pina P, Lousada M, Christiansen H H. Land cover classification using high-resolution aerial photography in adventdalen, Svalbard. Geografiska Annaler, 2015, 97(3): 473-488.

[65] Zhang J, Hu J B, Lian J B, Fan Z J, Ouyang X J, Ye W H. Seeing the forest from drones: testing the potential of lightweight drones as a tool for long-term forest monitoring. Biological Conservation, 2016, 198: 60-69.

[66] Trichon V. Crown typology and the identification of rain forest trees on large-scale aerial photographs. Plant Ecology, 2001, 153(1/2): 301-312.

[67] Nishar A, Richards S, Breen D, Robertson J, Breen B. Thermal infrared imaging of geothermal environments and by an unmanned aerial vehicle (UAV): a case study of the Wairakei-Tauhara geothermal field, Taupo, New Zealand. Renewable Energy, 2016, 86: 1256-1264.

[68] Whitehead K, Hugenholtz C H. Remote sensing of the environment with small unmanned aircraft systems (UASs), Part 1: a review of progress and challenges. Journal of Unmanned Vehicle Systems, 2014, 2(3): 69-85.

[69] Blaschke T, Tiede D, Heurich M. 3D Landscape metrics to modelling forest structure and diversity based on laser scanning data. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2004, XXXVI (8/W2): 129-132.

[70] Chen Z Y, Xu B, Devereux B. Urban landscape pattern analysis based on 3D landscape models. Applied Geography, 2014, 55: 82-91.

[71] Asner G P, Martin R E. Spectranomics: emerging science and conservation opportunities at the interface of biodiversity and remote sensing. Global Ecology and Conservation, 2016, 8: 212-219.

[72] Asner G P, Martin R E, Anderson C B, Kryston K, Vaughn N, Knapp D E, Bentley L P, Shenkin A, Salinas N, Sinca F, Tupayachi R, Huaypar K Q, Pillco M M, Álvarez F D C, Díaz S, Enquist B J, Malhi Y. Scale dependence of canopy trait distributions along a tropical forest elevation gradient. New Phytologist, 2016, 214(3): 973-988.

[73] Liang X L, Kukko A, Kaartinen H, Hyyppä J, Yu X W, Jaakkola A, Wang Y S. Possibilities of a personal laser scanning system for forest mapping and ecosystem services. Sensors, 2014, 14(1): 1228-48.

[74] Turner M G. Landscape ecology in North America: past, present, and future. Ecology, 2005, 86(8): 1967-1974.

[75] Fu B J, Liang D, Lu N. Landscape ecology: coupling of pattern, process, and scale. Chinese Geographical Science, 2011, 21(4): 385-391.

[76] Wu J G, He C Y, Huang G L, Yu D Y. Urban landscape ecology: past, present, and future//Fu B J, Jones K B, eds. Landscape Ecology for Sustainable Environment and Culture. Netherlands: Springer, 2013: 37-53.

[77] Frazier A E, Wang L. Modeling landscape structure response across a gradient of land cover intensity. Landscape Ecology, 2013, 28(2): 233-246.

[78] Levin S. The problem of scale in ecology. Ecology, 1992, 73: 1743-1767.

[79] Marquet P A. Invariants, scaling laws, and ecological complexity. Science, 2000, 289(5484): 1487-1488.

[80] 吕一河, 傅伯杰. 生态学中的尺度及尺度转换方法. 生态学报, 2001, 21(12): 2096-2105.

[81] Wu J G, Li H B. Perspectives and methods of scaling//Wu J G, Jones K B, Li H B, Loucks O L, eds. Scaling and Uncertainty Analysis in Ecology. Netherlands: Springer, 2006.

[82] Faye E, Rebaudo F, Yánez-Cajo D, Cauvy-Fraunié S, Dangles O. A toolbox for studying thermal heterogeneity across spatial scales: from unmanned aerial vehicle imagery to landscape metrics. Methods in Ecology & Evolution, 2015, 60(4): 1-10.